

Конструювання механізмів маніпуляторів мобільних роботів з паралельними кінематичними структурами на основі функціонально-орієнтованої елементної бази

С. В. Струтинський, І. В. Ночніченко

Для створення ефективних маніпуляторів мобільних роботів запропонована функціонально-орієнтована елементна база. Вибір елементної бази здійснено на основі аналізу схемних рішень маніпуляторів мобільних роботів. Обґрунтовано, що ефективними схемними рішеннями маніпуляторів є механізми з паралельними кінематичними зв'язками. Раціональною конструктивною схемою прийнято механізм, що має шість штанг змінної довжини (гексапод). Розглянуті схеми маніпуляторів мобільних роботів із різним числом і видом суміщених опор штанг. Доведено, що для реалізації різноманітних схем може бути застосована однотипна елементна база у вигляді сферичних шарнірів. Розглянуті різні варіанти реалізації схемних рішень маніпуляторів, побудованих на запропонованій функціонально-орієнтованій елементній базі. Сформульовані основні вимоги до елементної бази маніпуляторів мобільних роботів. Показано, що задоволення поставленим вимогам забезпечує функціонально-орієнтована елементна база на основі гідростатичних або аеростатичних шарнірів різного виду.

Запропоновано ряд варіантів схемних і конструктивних рішень регульованих сферичних гідростатичних та аеростатичних шарнірів. Високими точнісними характеристиками відрізняється гідростатичний сферичний шарнір, що включає точну кулю із кераміки (карбід бора). Проведена технологічна апробація даного схемного рішення шляхом виготовлення експериментального зразка.

Розроблено регульований гідростатичний шарнір, оснащений мехатронною системою встановлення просторового положення сфери. Дане конструктивне рішення дозволяє регулювати положення сфери шарніра в межах діаметрального зазору.

Запропоновано комбінований аеростатично-гідростатичний опорний вузол агрегатований з приводами маніпулятора. Вузол має струменеву систему регулювання опорних реакцій аеростатично-гідростатичних опор сферичного шарніра. Проведена технологічна апробація розробленого пристрою.

Для підвищення ефективності запропонованої елементної бази розроблено спеціальні алгоритми системи керування положенням сферичних шарнірів маніпуляторів. Алгоритми розроблені на основі математичного моделювання динамічних процесів у шарнірних пристроях. Алгоритми включають реалізацію просторових полігармонічних переміщень сфери із цілеспрямованим вибором напрямку результуючих переміщень, що забезпечує необхідну точність та швидкодію процесу регулювання положення шарнірів маніпулятора

Ключові слова: мобільні роботи, схеми маніпуляторів, гідростатичні шарніри, аеростатичні опори, алгоритми керування

1. Вступ

Маніпулятори з паралельними кінематичними зв'язками мають велику вантажопідйомність при низькій масі у порівнянні з традиційними конструкціями. Такі маніпулятори є ефективними при застосуванні в наземних роботизованих комплексах, призначених для роботи з небезпечними об'єктами, оскільки дозволяють значно покращити їх масові та габаритні характеристики. Застосування пристроїв такого типу стримується відсутністю ефективної елементної бази. Тому роботи в напрямку створення функціонально-орієнтованої елементної бази, що дозволить виконувати необхідні функції маніпуляторів та покращити їх характеристики, є актуальною задачею.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У літературному джерелі [1] наведені дослідження по розробленню пристрою, що включає маніпулятор складної конфігурації. При цьому значна увага приділена кінематиці, але при цьому не враховано особливості функціонування елементної бази. В публікації [2] представлені результати аналізу статичної і динаміки маніпуляторів. До невирішених питань можна віднести практичну реалізацію системи з покращеними динамічними характеристиками. Значну увагу приділено вимогам, які висуваються до маніпуляторів, зокрема надійності роботи та вантажопідйомності [3]. У літературному джерелі [4] вказано шляхи і методи забезпечення точності маніпуляторів. Показано, що параметри точності значною мірою залежать від динамічних властивостей маніпуляторів. До невирішених питань можна віднести необхідність врахування зміни інерційних властивостей маніпуляторів паралельної структури. Дослідженню динамічних характеристик маніпуляторів присвячена публікація [5]. Для мобільних роботизованих комплексів динаміка маніпулятора залежить від дорожніх умов та виду рушія [6], проте наявні обмежені дані про елементну базу маніпуляторів, зокрема мобільних роботизованих комплексів. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що проблема в загальному вигляді полягає у створенні елементної бази, яка забезпечить створення високонадійних маніпуляторів з необхідним ресурсом роботи в жорстких умовах експлуатації. У джерелі [7] зазначено, що основними вузлами маніпуляторів є шарніри, які забезпечують рухомість просторових структур та систем приводів маніпуляторів. Покращення характеристик цих елементів є перспективним шляхом, що дозволить підвищити технічний рівень маніпуляторів мобільних роботів. У публікації [8] окреслено ряд вимог до геометричних параметрів, зокрема діапазонів поперечно-кутових переміщень шарнірів. Розглянуто окремі конструкції шарнірів маніпуляторів, побудованих на основі механізмів із паралельними кінематичними структурами [9]. Дослідженню динаміки просторових маніпуляторів присвячена публікація [10]. В результаті досліджень встановлено, що врахування динамічних процесів різного масштабу швидкодії дозволяє покращити точність позиціонування маніпуляторів.

У наведених вище літературних джерелах відсутні конкретні технічні рішення шарнірів, що забезпечують необхідні характеристики по точності, жорсткості та швидкодії. Тому в результаті проведеного аналізу встановлено, що існує

невирішена раніше частина загальної проблеми, яка полягає у розробленні функціонально-орієнтованої елементної бази маніпуляторів мобільних роботів, побудованих на основі механізмів із паралельними кінематичними структурами.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розроблення та технологічна апробація функціонально-орієнтованої елементної бази маніпуляторів мобільних роботів побудованих на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- дослідити схемні рішення маніпуляторів мобільних роботів, побудованих на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами із визначенням функціональних вимог до елементної бази маніпуляторів;
- розробити конструкцію та технологію виготовлення сферичного шарніра, який включає високоточну сферу;
- розробити конструкцію та технологію виготовлення регульованого сферичного шарніра агрегатованого з приводом, що є основним елементом маніпулятора на основі механізму з паралельними кінематичними структурами;
- провести математичне моделювання мехатронної системи регулювання положення шарнірів маніпуляторів та розробити алгоритм динамічного регулювання положення сфери.

4. Аналіз схемних рішень маніпуляторів мобільних роботів

Перспективним видом маніпуляторів мобільних роботів є системи на основі просторових шарнірних механізмів із приводами зміни розмірів окремих ланок механізмів. Прикладами таких систем є механізми триподу та механізми-гексаподи. Застосовуються також механізми із ланками постійної довжини із рухомими шарнірними опорами. В даний час розроблені і використовуються стаціонарні маніпулятори, металорізальні верстати, сенсори, випробовувальні машини, вимірювальні машини різних видів та інші. Найбільш поширеними є конструкції типу гексапода, що мають шість штанг змінної довжини. Також використовуються маніпулятори типу триглайда із трьома штангами постійної довжини із шарнірами, які рухаються по напрямних. В маніпуляторах застосовуються шарніри різних видів. Головною частиною маніпулятора на основі просторових механізмів з паралельними кінематичними структурами є виконавчий орган. Для забезпечення фіксованого положення виконавчого органу в просторі необхідно фіксувати як мінімум три його точки A_1, B_1, C_1 (рис. 1).

На рисунку наведено маніпулятор на основі механізма гексапода, який має 6 суміщених шарнірних опор штанг. Три із них A_1, B_1, C_1 розташовані на виконавчому органі, а три A, B, C знаходяться на шасі мобільного роботизованого комплексу. В залежності від числа суміщених опор n має місце відповідне схемне рішення механізма-гексапода (рис. 2).

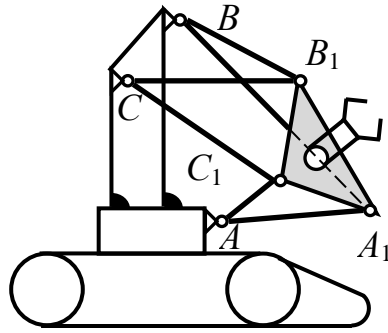


Рис. 1. Геометрична схема мобільного роботизованого комплексу із маніпулятором на основі механізму-гексапода

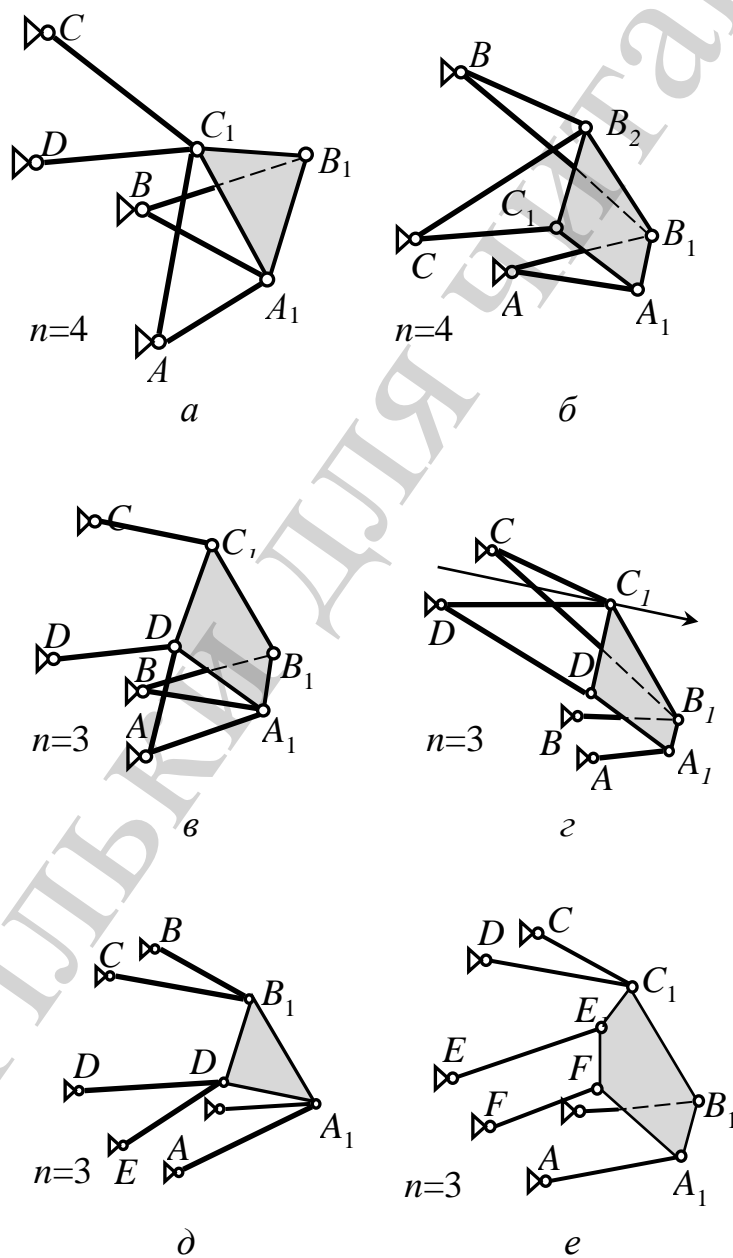


Рис. 2. Схемні рішення механізмів-гексаподів із різним числом суміщених шарнірних опор: а, б – 4 суміщених опори; в–е – 3 суміщених опори

Всі запропоновані схемні рішення можуть бути реалізовані на однотипній функціонально-орієнтованій елементній базі, яка включає шарніри і приводи зміни довжини штанг.

Окремим випадком схемного рішення є механізм без суміщених опор. Механізм реалізується у вигляді модуля і включає базовий шестикутник розташування шарнірів на основі модуля (рис. 3).

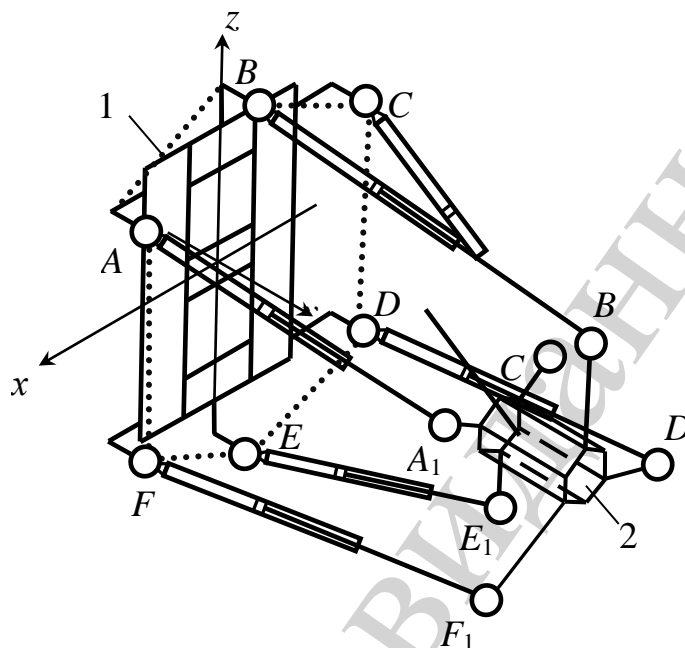


Рис. 3. Схемне рішення маніпулятора на основі механізма-гексапода, який не має суміщених шарнірів

Шарніри A, \dots, F розташовані на основі 1 маніпулятора, а відповідні кінцям штанг шарніри A_1, \dots, F_1 з'єднані із виконавчим органом 2. Основа встановлюється на шасі мобільного роботизованого комплексу, а виконавчий орган служить для встановлення необхідних пристосувань для маніпулювання об'єктами та пристроїв для оброблення об'єкта. Елементна база, потрібна для реалізації даного схемного рішення, включає шарніри з необхідним числом ступенів вільності та агрегатовані з ними приводи.

Запропоновано також схемне рішення маніпулятора у вигляді гібридного механізма гексапода, який додатково містить дві рухомі сферичні опори.

Для реалізації запропонованих схемних рішень необхідна елементна база у вигляді шарнірів із різним числом ступенів вільності. Число ступенів вільності є однією із функціональних вимог до шарнірів. Як правило, використовуються шарніри із 2-ма та трьома ступенями вільності (сферичні шарніри). Переміщення шарніра, відповідне наявному числу ступенів вільності, відбувається в певному діапазоні. Необхідні діапазони поперечно-кутових переміщень встановлюються на основі геометричного аналізу механізму відповідного вибраній схемі.

Запропонована елементна база забезпечує додаткові ступені вільності шарніра в межах мікропереміщень у двох або трьох напрямках. Це дає можливість суттєво підвищити точність шарнірів, а відповідно і точність маніпулятора в цілому. Мікропереміщення шарнірів здійснюються спеціальними мехатронними системами керування, якими укомплектована запропонована елементна база. Система керування включає вимірювачі положення шарніра.

Важливою функціональною вимогою до елементної бази є несуча здатність шарніра. Висока несуча здатність забезпечується при мінімальних силах тертя шляхом використання рідинного або газового робочого середовища. Тому функціонально-орієнтована елементна база в своїй основі включає гідростатичні або аеростатичні шарніри різного виду. Наявність рідинного або газового робочого середовища обумовлює доцільність використання в маніпуляторах систем гідро- або пневмоприводу. Зазначені положення є основними складовими функціональних вимог до елементної бази маніпуляторів мобільних роботів побудованих на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами.

5. Конструктивна реалізація та технологічна апробація високоточного сферичного гідростатичного шарніра, який включає високоточну сферу

Традиційно в просторових механізмах із паралельними кінематичними структурами в якості шарнірних опор застосовуються опори ковзання та опори на підшипниках кочення. Недоліком шарніра ковзання є значні сили тертя, наявність люфтів і зазорів у фрикційній парі. Це приводить до виникнення значних статичних і динамічних навантажень в шарнірному вузлі, підвищеному зносу деталей шарніра. В опорах на підшипниках кочення сили тертя значно менші, але наявність механічного контакту спричиняє різкі зміни навантаження, удари, а відповідно шуми і вібрації в механізмі. В результаті аналізу наявних технічних рішень встановлено, що опори ковзання і кочення не відповідають вимогам, які висувуються до опор мобільних роботів побудованих на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами.

Сформульованим вище технічним вимогам задовольняють безконтактні гідростатичні опори. Такі опори мають високу точність і жорсткість, задовільні демпфуючі якості. Тиск живлення в гідростатичних опорах складає 4–6 МПа і вище. Це обумовлює високу несучу здатність гідростатичних опор. При цьому забезпечується стабільність положення опори незалежно від змін навантаження. Проблемою розроблення сферичної гідростатичної опори є забезпечення високої точності поверхні (порядка 1 мкм). Проблема розв'язана використанням точної кулі із кераміки (карбід бора, нітрид бора).

Розроблено варіант гідростатичної опори із сферичною вставкою та проведена його технологічна апробація. Для цього виготовлено експериментальний зразок опори (рис. 4).

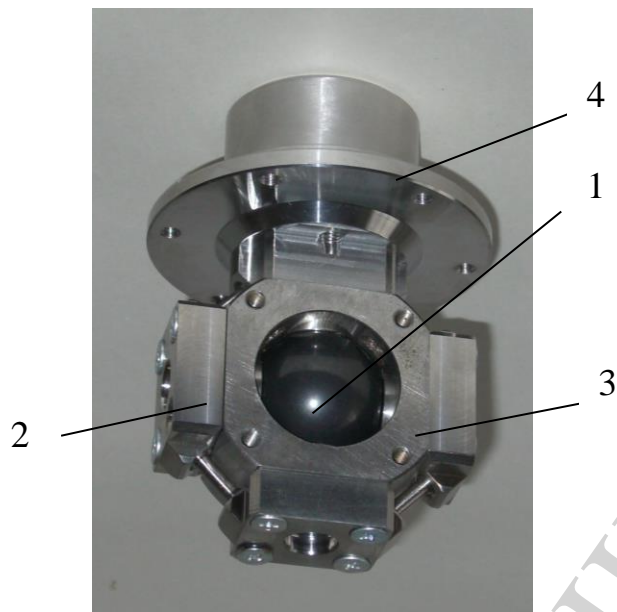


Рис. 4. Експериментальний зразок гідростатичної опори маніпулятора, яка включає кулю із кераміки: 1 – куля; 2 – опорні вставки; 3 – рамка; 4 – кришка

Куля із карбіда бора 1 має відхилення від сферичності близько 1 мкм. Зміни температури практично не впливають на розмір кулі. З кулею взаємодіють сферичні гідростатичні підшипники, які виконані в опорних вставках 2, які закріплені в рамці 3, що з'єднана із кришкою 4. Наведений на рисунку вузол входить в порожнину корпусу опори 5 (рис. 5).

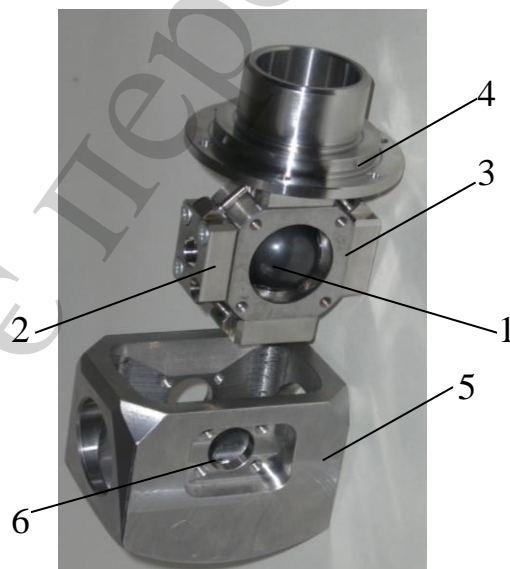


Рис. 5. Збирання сферичної опори по окремим вузлам: 1 – куля; 2 – опорні вставки; 3 – рамка; 4 – кришка; 5 – корпус; 6 – отвори

Корпус 5 має отвори 6 в які поміщаються втулки 7 для закріплення керамічної кулі (рис. 6).

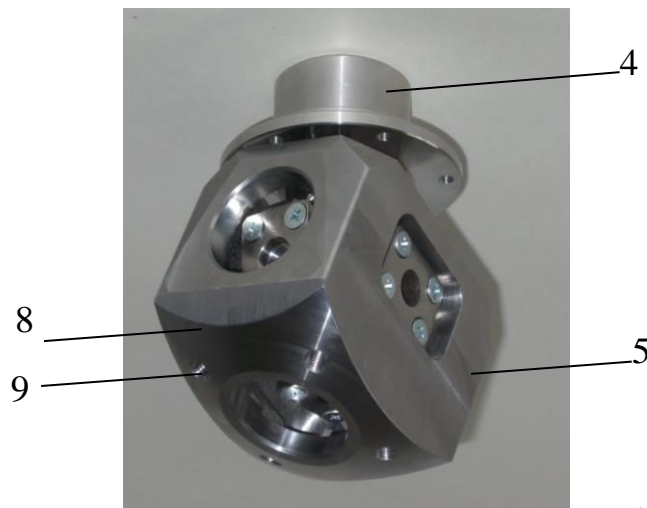


Рис. 6. Корпус з отворами в які поміщаються втулки для закріплення керамічної кулі: 4 – кришка; 5 – корпус; 8 – сферична поверхня; 9 – різьбові отвори

Кришка 4 здійснює поперечно кутові переміщення в просторі в межах певного діапазону. На корпусі 5 виконана сферична поверхня 8 в якій наявні різьбові отвори 9, що служить для закріплення корпуса опори. Наявність сферичної поверхні дає можливість встановити необхідне початкове положення опори відносно нерухомої основи або маніпулятора.

Кришка опори закріплюється на штанзі маніпулятора (рис. 7).

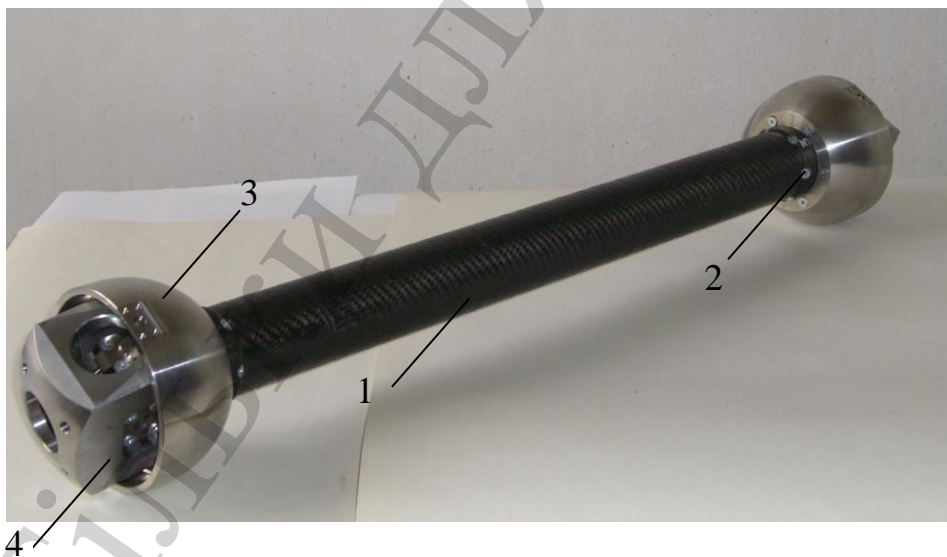


Рис. 7. Штанга маніпулятора із встановленими на її кінцях сферичними опорами: 1 – труба; 2 – гвинти; 3 – кожухи; 4 – корпуси опор

Штанга має трубу 1 виконана із композитного матеріалу (вуглепластик). На трубі гвинтами 2 закріплюються кришка сферичних опор. На кришках встановлюються кожухи 3, що захищають опори від попадання бруду. На кожухах закріплюються гумо тканні сильфони, які герметизують порожнини гідростати-

чних опор. Корпуси опор 4 закріплюються на рухомій платформі маніпулятора або на каретках напрямних. Штанга виконується в різних варіантах. Можлива реалізація штанги постійної довжини або установка у середній частині штанги привода з передачею гвинт-гайка кочення.

Розроблений високоточний сферичний гідростатичний шарнір, який включає кулю із кераміки, має високі технічні характеристики у відношенні точності позиції шарніра в межах 1 мкм. Висока твердість кулі, виготовленої із карбіда бора або нітрида бора, визначає високу довговічність і стабільність параметрів гідростатичного шарніра. Тому такий шарнір рекомендується в якості типового представника функціонально-орієнтованої елементної бази маніпуляторів мобільних роботів, побудованих на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами. Найбільш доцільно застосувати дані шарніри в маніпуляторах типу гексаглайда, що мають штанги постійної довжини. При цьому похибки, обумовлені змінами довжини штанг, можуть бути компенсовані приводами переміщення шарнірних опор. Для маніпуляторів, побудованих на основі просторових механізмів загального виду, запропонована конструкція шарніра, вдосконалена в напрямку розширення її функціональних можливостей шляхом регулювання положення сфери шарніра, як це показано нижче.

6. Схемна та конструктивна реалізація і технологічна апробація регульованого гідростатичного сферичного шарніра

Розроблений гідростатичний сферичний опорний вузол призначено для сприйняття необхідних навантажень (до 5 кН), які діють на сферу, та точного регулювання положення сфери в просторі. Одночасно з регулюванням положення сфери здійснюється вимірювання фактичного положення сфери відносно корпусу шарніра. Регулювання і виміри положення сфери забезпечуються системою гідроавтоматики.

Сфера шарніра може здійснювати обмежені поперечно-кутові переміщення в межах конуса з кутом при вершині 40° . Зміщення сфери в радіальному напрямку здійснюється в межах радіального зазору між сферою і стінками корпусу і кришки. Максимальний діаметральний зазор може складати 50–100 мкм.

Додатково опорний вузол виконує функцію підводу і відводу робочої рідини до рухомих частин системи приводів маніпулятора при значних для зміни його положення і конфігурації. Підвід і відвід робочої рідини здійснюється через отвори в рухомій сфері шарніра і відповідні комунікації в корпусі опори.

Розроблений регульований гідростатичний опорний вузол має нерухомий корпус 1 (рис. 8).

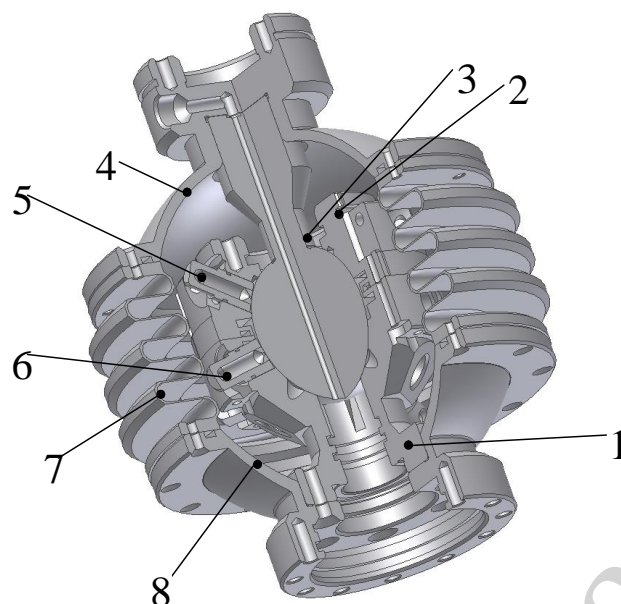


Рис. 8. Конструктивне виконання регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла: 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – сфера; 4 – кожух верхній; 5, 6 – штуцери; 7 – сильфон; 8 – кожух нижній

Корпус 1 з'єднаний із кришкою 2. В сферичній порожнині корпуса і кришки розміщена рухома сфера 3. Із рухомою сферою з'єднано кожух верхній 4. В корпусі і кришці встановлені підвідні штуцери 5 і 6 для вимірювачів "сопло-заслонка" та гідростатичних підп'ятників.

Кожух верхній через сильфон 7 приєднаний до кожуха нижнього 8, який жорстко з'єднаний із нерухомим корпусом 1.

В корпусі виконано дев'ять різьбових отворів розташованих по периметру корпуса, а в кришці шість різьбових отворів.

Шість отворів в корпусі служать для установки трьох вимірювачів положення сфери типу "сопло-заслонка" та трьох гідростатичних підп'ятників. Три отвори в корпусі служать для установки трьох гідростатичних підп'ятників. Шість отворів служать для установки трьох вимірювачів "сопло-заслонка" та трьох гідростатичних підп'ятників.

Різьбові отвори є ідентичними. В них встановлюються гідростатичні підп'ятники з дроселями або вимірювачі типу "сопло-заслонка" (рис. 9).

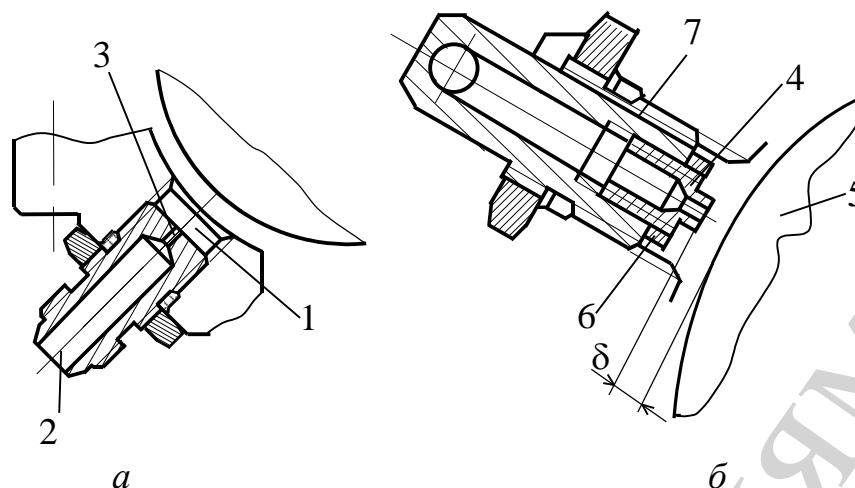


Рис. 9. Схема гідравлічної системи: *а* – гідростатичного підп'ятника; *б* – вимірювача “сопло-заслонка”

Гідростатичні підп'ятники (рис. 9, *а*) мають камери 1, до яких підводиться робоча рідина із магістралі 2 через дросель 3. Вимірювач положення сфери типу “сопло-заслонка” (рис. 9, *б*) має сопло 4, торець якого розташований паралельно поверхні сфери 5.

Сопло 4 встановлено з можливістю переміщення вздовж осі вимірювача. Цим забезпечується регулювання початкового положення сопла.

Для фіксації сопла служить контргайка 6. На різьбовій частині вимірювача виконана канавка 7, яка служить для дренажу рідини із порожнини вимірювача.

Регульований сферичний гідростатичний опорний вузол має розгалуження гідро схему, яка включає ряд підсистем. Основною є підсистема сприйняття опорної реакції та переміщення сфери в напрямку осі z . Дана підсистема об'єднує шість гідростатичних підп'ятників 1В, 3В, 5В, 1Н, 3Н, 5Н, згрупованих по двох поясах: верхньому (1В, 3В, 5В) та нижньому (1Н, 3Н, 5Н) (рис. 10).

В опорі наявна система вимірів положення сфери, що включає три пари вимірювачів “сопло-заслонка”, включених по диференціальній схемі. Пари вимірювачів (4Н, 6В), (2Н, 4В) та (6Н, 2В) розташовані в трьох діаметральних відносно сфери напрямках.

Вимірювачі підключені до мембранних перетворювачів П1–П3, які визначають значення перепаду тиску на кожній парі вимірювачів. Переміщення мембран реєструється тензовимірювачами Δ_1 – Δ_3 .

В системі автоматичного керування регульованої сферичної гідростатичної опори наявний керуючий інтелектуальний блок (на рис. 10 не показаний), що служить для формування необхідних законів переміщення гідророзподільників Р1–Р3, враховуючи виміряне фактичне просторове положення сфери.

Розроблений регульований сферичний гідростатичний опорний вузол має широкі функціональні можливості у відношенні забезпечення точності та регулювання положення шарніра. Такий вузол рекомендується в якості прогресивного представника елементної бази маніпуляторів мобільних роботів. Даний вузол доцільно застосовувати в якості шарнірів маніпуляторів із ланками змінної довжини, побудованих по схемі механізмів-гексаподів. При цьому похибки маніпулятора компенсуються безпосереднім регулюванням положень відповідних опорних вузлів.

До недоліків наведених опорних вузлів відноситься необхідність герметизації порожнини та недостатня гнучкість регулювання. Тому регульований опорний вузол вдосконалено у напрямку можливості використання рідинно-газового або газового робочого середовища та підвищення ефективності регулювання положення сфери. При цьому передбачена можливість агрегувати опорного вузла із приводом зміни довжини ланки маніпулятора, яка з'єднана із шарніром, як це показано нижче.

7. Сферичний регульований аеростатично-гідростатичний опорний вузол агрегатований з приводами маніпулятора

Розроблений сферичний аеростатично-гідростатичний опорний вузол агрегатований з приводом зміни довжини штанги маніпулятора. Пристрій може використовувати в якості робочого середовища, як рідину, так і газ. При цьому допускається робота пристрою на газо-рідинній суміші. Вузол сприймає навантаження в межах до 500 Н і забезпечує ефективне регулювання положення сфери до 100 мкм.

Шарнір опорного вузла має корпус 1, з яким з'єднується кришка 2 (рис. 11).

Пристрій має спеціальні гвинтові приводи 3 і 4 призначені для переміщення кришки відносно корпусу. В якості приводів застосовуються гвинтові механізми та спеціальні термомеханічні приводи переміщень. Гвинтові механізми служать для початкового регулювання опори, а термомеханічні – для компенсації температурних деформацій ланок маніпулятора, які мають місце при змінах температури.

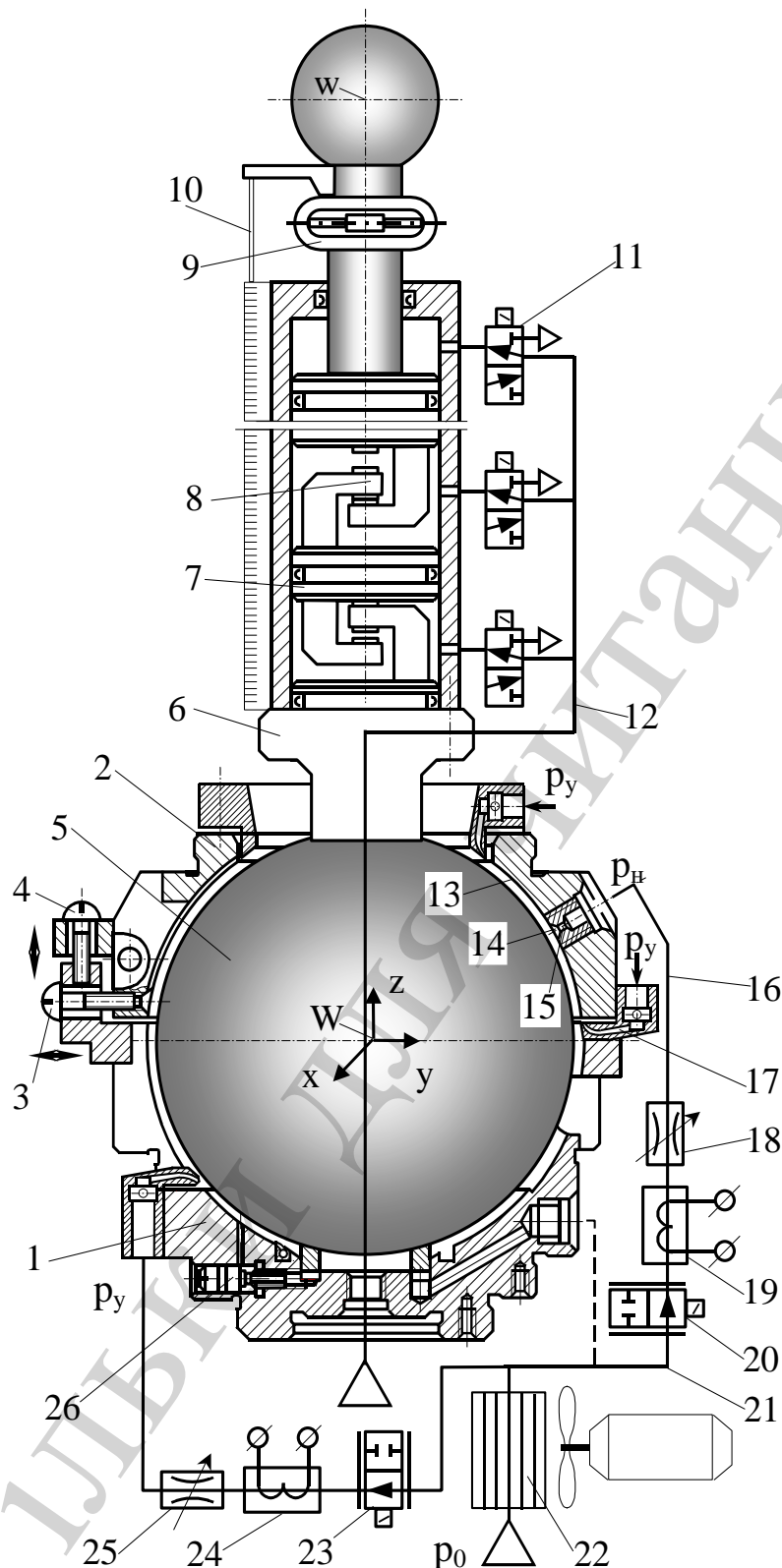


Рис. 11. Конструктивна схема регульованої аеростатично-гідростатичної сферичної опори з приводом зміни довжини штанги: 1 – корпус; 2 – кришка; 3, 4 – гвинтові приводи; 5 – точна сферична поверхня; 6 – штанга маніпулятора; 7 – поршні; 8 – упори; 9 – пристрій мікропереміщень; 10 – вимірювач; 11 – регульовані дроселі; 12 – магістраль; 13 – кармани; 14 – дросель; 15 – опорні вузли; 16 – магістраль; 17 – сопловий пристрій; 18 – дросель; 19 – нагрівач; 20 – розподільник; 21 – магістраль; 22 – радіатор; 23 – розподільник; 24 – нагрівач; 25 – регульований дросель

Корпус і кришка мають порожнину із ділянками точних сферичних поверхонь 5, в які із зазором поміщається рухома сфера, з'єднана із штангою маніпулятора 6 побудованого на основі механізму із паралельними кінематичними структурами. На сферичних ділянках корпусу і кришки розміщені аеростатично-гідростатичні опори із вставками. Опори мають дроселі, до яких підводиться повітря або рідина під тиском p_n . Всього опорний вузол має кілька аеростатично-гідростатичних опор. Частина з них має регульовані дроселі, що дозволяють в певних межах регулювати середнє (нульове) положення центра сфери W відносно корпусу.

Опорний вузол має гідравлічну струменеву систему регулювання несучої спроможності окремих аеростатичних опор. Це здійснюється динамічною дією струменів робочої рідини на периферійні ділянки аеростатичних опор. Струмені формуються в соплових пристроях, виготовлених методом лазерної стереолітографії. Зміною тиску робочої рідини p_{y1}, p_{y2}, p_{y3} забезпечується зміна параметрів струменів, а відповідно і регулювання положення сфери відносно корпусу в напрямках x, y, z .

Опорний вузол має комунікації для підводу рідини або газу до рухомої штанги, яка є складовою механізму маніпулятора і включає приводи зміни довжини штанги.

В якості приводів використовуються електромеханічні, гідравлічні або пневматичні пристрої. Запропоноване схемне і конструктивне рішення, наведене на рис. 11, включає приводи дискретної дії (цифрові приводи). Приводи мають ряд поршнів 7 з упорами 8, а також привод мікропереміщень 9. Точні розміри довжини штанги визначаються вимірювачем 10.

Приводи дискретної дії керуються спеціальною системою, яка включає ряд розподільників, що подають робоче середовище в порожнини циліндрів. Підвід робочого середовища до регульованих дроселів 11 здійснюється від магістралі 12.

Рухома сфера встановлена в корпусі і кришці на статичних опорах рідинного тертя (аеростатичних або гідростатичних). Опорні вузли розташовані регулярним чином по периферії сферичної поверхні. Опорні вузли 15 мають кармани 13, в які через нерегульовані дроселі 14 подається робоче середовище від магістралі 16.

Опорні вузли мають по своїй периферії систему соплових пристроїв 17, які служать для гідродинамічного запирання щілини на виході або аеростатично-гідростатичного опорного вузла.

Кожний опорний вузол має автономну регульовальну систему живлення і керування. Регулювання потоку середовища до кармана аеростатичної опори здійснюється системою регульованих дроселів 18,25 і нагрівачів 19,24. Підвід робочого середовища до системи дроселів здійснюється через розподільники 20, 23 від магістралі 21, в яку подається робоче середовище, охолоджене в радіаторі 22. Регулювання параметрів потоків у соплових пристроях здійснюється аналогічними системами керування, що включають регульовані дроселі та нагрівачі. Конструктивне виконання регульованих дроселів дозволяє виконати ручне регулювання опору дроселя і забезпечити необхідне початкове положення рухомої сфери.

Регулювання положення сфери здійснюється різними способами: зміною взаємного положення елементів та деформуванням деталей опори, нагріванням окремих ділянок деталей, введенням або відключенням додаткових опор, зміною витрати та термодинамічних параметрів робочого середовища.

Опорний вузол має систему вимірів положення сфери відносно корпусу. Для цього використовуються безконтактні вимірювачі «сопло-заслонка», що включені відповідно наведеної раніше схеми (рис. 10).

Розроблена конструктивна схема послужила основою для виготовлення макетного зразка опорного вузла. Розроблена технічна документація, вирішені технологічні проблеми виготовлення опори. Виготовлено експериментальний зразок опори. Основними з точки зору технологічного забезпечення параметрів якості є деталі опорного вузла із точними сферичними поверхнями (рис. 11).



Рис. 11. Основні деталі виготовленого опорного вузла та ділянки точних сферичних поверхонь деталей: 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – сферичний сегмент; 4 – сферичний сектор; 5 – рухома сфера 6, 7 – сферичні поверхні

Основні технологічні труднощі виготовлення опорного вузла полягають в обробці ділянок точних сферичних поверхонь корпусу, кришки і сфери. Корпус 1 і кришка 2 мають ділянки сферичних поверхонь у вигляді сферичного сегмента 3 та сферичних секторів 4. Сферичні поверхні корпусу і кришка виготовлені з допуском на сферичність 15–30 мкм. Внутрішня сферична поверхня кришки 2 має регульовану геометрію, що обумовлює суттєві відхилення реальної поверхні від номінальної сферичної поверхні. Рухома сфера 5 опорного вузла виконана збірною, що має дві окремі деталі із точними сферичними поверхнями 6 і 7, які закріплені на спільній осі 5. Сферичні поверхні виконані на верхній і нижній половинках рухомої сфери, повинні узгоджуватись між собою і при збиранні утворювати одну точну сферичну поверхню. Забезпечення точності даної поверхні здійснюється підгонкою базуючих і центруючих поверхонь в з'єднанні

верхньої і нижньої половин рухомої сфери. Проміжний і остаточний контроль одержаної поверхні здійснено на вимірювальній машині (рис. 12) з обробкою результатів вимірів по спеціальній методиці.

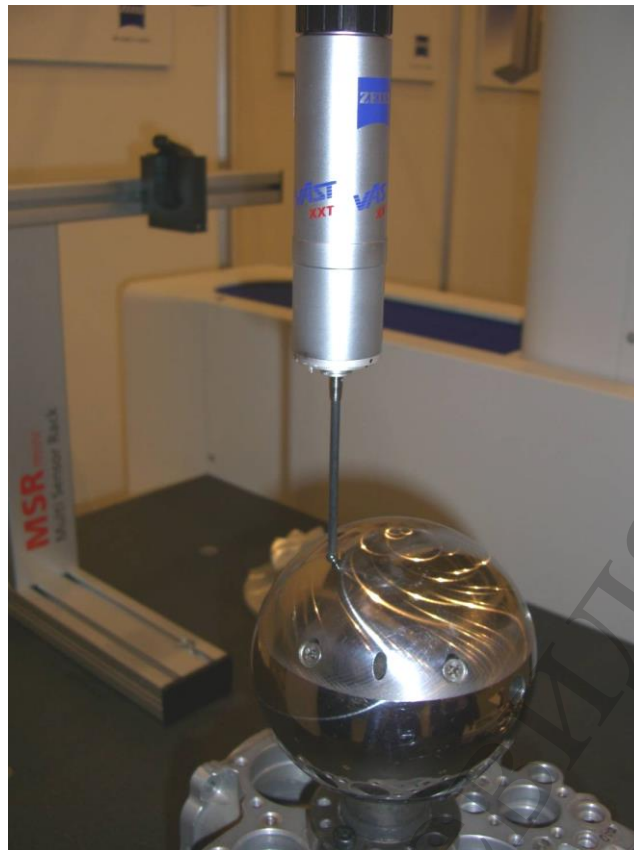


Рис. 12. Виміри сферичної поверхні рухомої сфери на вимірювальній машині при скануванні поверхні в напрямку координат x і y

Виміри геометрії зібраного вузла рухомої сфери здійснено при одній установці сфери на столі вимірювальної машини. Виміри реальної поверхні верхньої половини рухомої сфери виконано в межах квадратної ділянки проекції сферичної поверхні на горизонтальну площину Oxy . При вимірах щуп вимірювальної машини здійснює сканування сферичної поверхні при переміщенні в напрямках x , y , що відповідають горизонтальним вісям декартової прямокутної системи координат xOy . Виміри геометрії нижньої частини сфери здійснено сканування сферичної поверхні при переміщенні щупа в напрямках xz та yz . Встановлено, що відхилення від сферичності збірної сфери знаходиться в межах 7 мкм.

Розроблений сферичний регульований аеростатично-гідростатичний опорний вузол агрегатований з приводами маніпулятора рекомендується в якості ефективної елементної бази маніпуляторів мобільних роботів побудованих на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами. Застосування рідинно-газового середовища суттєвим чином підвищує ефективність шарнірного вузла маніпулятора. Гнучка система регулювання положення сфери забезпечує високі показники точності маніпулятора. Підвищення точності додатково

забезпечується спеціальними алгоритмами роботи системи керування опорного вузла, розробка якого здійснена на основі математичного моделювання результату, якого викладені нижче.

8. Математичне моделювання і система керування шарніра та алгоритм регулювання положення сфери

Підвищення точності шарніра здійснено з використанням спеціального алгоритму регулювання положення сфери побудованого на основі математичного моделювання динамічних процесів регулювання опорного вузла.

Динамічні характеристики сферичного опорного вузла згідно визначено у вигляді системи передавальних функцій, які описують динаміку кожного гідростатичного підп'ятника та переміщення сфери в цілому. Дана система передавальних функцій реалізована у вигляді структурної моделі.

Векторне рівняння динамічних переміщень сфери в довільному напрямку (рис. 4) має вигляд:

$$m \frac{d^2 \vec{e}}{dt^2} = -\vec{F}_\Sigma(t, e) - b \frac{d\vec{e}}{dt} + \vec{F}(t), \quad (1)$$

де m – маса рухомої сфери; $\vec{F}_\Sigma(t, e)$ – сумарна сила яка діє на сферу в напрямку e з боку всіх гідростатичних підп'ятників 1В, 3В, 5В, 1D–3D, 1Н, 3Н, 5Н та 1П; b – коефіцієнт опору при переміщенні сфери; $\vec{F}(t)$ – зовнішні динамічні навантаження на сферу; t – час.

Векторне рівняння (1) відповідає трьом скалярним рівнянням, що визначають проекції переміщення сфери на осі координат x , y , z . Найбільш важливими є переміщення сфери в напрямку вісі z , яка співпадає з віссю штанги.

Для моделювання переміщення сфери в напрямку z із рівняння (1) одержано скалярне рівняння, яке визначає переміщення сфери. Відповідно даному рівнянню побудована структурна математична модель у системі Simulink пакету Matlab R2014a. Структурна модель має вигляд ланцюга подвійного інтегрування із місцевим зворотнім зв'язком (рис. 13).



Рис. 13. Дослідження динамічних переміщень сфери

Входами даної моделі є проекція на вісь z зовнішнього навантаження на сферу F_z та сумарна сила F_{sz} , яка діє на сферу в напрямку z з боку всіх підп'ятників. Виходом моделі є динамічне переміщення сфери e_z в напрямку вісі z .

Сума реакцій всіх окремих підп'ятників опори визначається залежністю:

$$F_{\Sigma}(t, e) = \sum_{i=1}^N F_i(t, \delta_i) \cdot \cos \alpha_i,$$

де α_i – кут між напрямком переміщення сфери (напрямок вісі z) та віссю i -го підп'ятника; $F_i(t, \delta_i)$ – сила, яка діє на сферу з боку i -го підп'ятника, яка внаслідок переміщення e одержала зміну зазору $\delta_i = e \cdot \cos(\alpha_i)$.

Сумарна сила, яка діє на сферу в напрямку z з боку всіх підп'ятників визначена за допомогою структурної моделі (рис. 14).

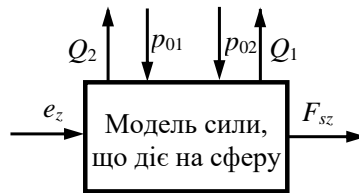


Рис. 14. Математична модель сумарної сили, яка діє на сферу в напрямку z з боку всіх гідростатичних підп'ятників

Входами даної моделі є перепад тиску p_{01} , p_{02} який формується на виході гідророзподільника P1 (рис. 13). Залежним входом моделі є переміщення сфери e_z та тиск в порожнині опорного вузла p_{a1} . Виходами моделі є сумарна сила F_{sz} , що діє на сферу та витрати рідини через всі три підп'ятники (1В, 3В, 5В) верхнього пояса Q_1 та всі три підп'ятники (1Н, 3Н, 5Н) нижнього пояса Q_2 . Взаємозв'язок тисків і витрат розподільника, встановленого за допомогою спеціальної моделі. Математична модель дросельного гідророзподільника побудована з використанням рівнянь гідравлічних характеристик течії рідини в регульованих дроселях гідророзподільника модель зв'язує значення тисків p_{01} , p_{02} із параметрами розподільника за допомогою наступних співвідношень:

$$p_{01} = p_0 - \frac{\rho}{2} \frac{Q_1}{\mu_1^2 f_1^2} |Q_1|,$$

$$p_{02} = p_c + \frac{\rho}{2} \frac{Q_2}{\mu_3^2 f_3^2} |Q_2|, \quad (2)$$

де p_0 , p_c – тиск живлення та тиск в гідробаці; ρ – густина рідини, μ_1 , μ_3 – коефіцієнти витрати при течії рідини через дросельні щілини розподільника; f_1 , f_3 – еквівалентний площі перетину дросельних щілин; Q_1 , Q_2 – витрати рідини і гідромагістралях на виході розподільника.

Прийнято, що площі перетину дросельних відповідають нечітко визначеним (fuzzy) залежностям:

$$f_1 = f_0 + kx_z + \delta f_1,$$

$$f_3 = f_0 - kx_z + \delta f_2, \quad (3)$$

де f_0 – номінальна еквівалентна площа щілини; x_z – переміщення золотника; k – коефіцієнт пропорційності; $\delta f_1, \delta f_2$ – нечітко визначені зміни еквівалентної площі поперечного перетину щілин розподільника.

Нечітко визначені зміни еквівалентної площі щілин також враховують зміни коефіцієнтів витрати щілин. Тому в математичній моделі прийнято, що коефіцієнти витрати відповідають деяким середнім значенням і є постійними. Відповідно:

$$\mu_1 = \text{const}, \mu_3 = \text{const}.$$

На основі залежностей (2), (3) побудована структурна математична модель гідророзподільника.

Структурна модель розподільника (рис. 15) має своїм основним входом переміщення золотника x_z , а додатковими входами витрати рідини Q_1, Q_2 в гідромагістралях.



Рис. 15. Математична модель гідророзподільника P1

Нечітко визначені зміни характеристики золотникового розподільника, що входять в залежності (3) задані в математичній моделі випадковими процесами з постійною спектральною щільністю при різних частотах збурень робочого діапазону частот.

Виходами математичної моделі розподільника є значення тисків p_{01} та p_{02} на виході гідророзподільника.

Об'єднавши блочні моделі гідророзподільника (рис. 15) силової характеристики опорного вузла (рис. 14) та динамічних переміщень сфери (рис. 13), одержимо загальну структурно-блочну модель системи керування опорного вузла по координаті z (рис. 16).

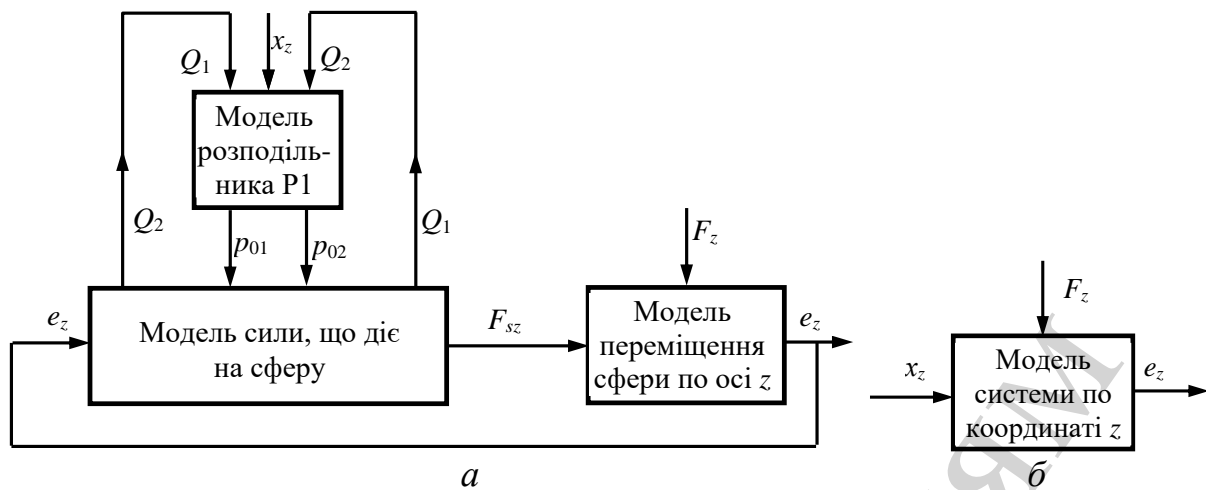


Рис. 16. Система керування опорного вузла по координаті z : a – структурно-блочна модель; $б$ – блок-схема даної моделі

Структурна математична модель апробована розрахунком перехідного процесу переміщення сфери z при ступінчастій зміні вхідного сигналу у вигляді переміщення золотника p_1 x_z .

Із аналізу перехідного процесу встановлено, час перехідного процесу складає $0.7 \dots 0.8$ с. Має місце значне перерегулювання системи (120 % і більше).

З метою поліпшення динамічних властивостей системи доцільно ввести зворотні зв'язки по фактичному положенню сфери в просторі використавши виміри фактичного положення сфери.

Математична модель системи керування положення сфери по координаті z доповнена аналогічними моделями для координат x і y та математичною моделлю системи вимірів просторового положення сфери. В результаті одержана загальна математична модель системи керування (рис. 17).

Система керування має інтелектуальний блок, який формує оптимальний алгоритм керування положення сфери. Виходом інтелектуального блока є сигнали, що відповідають переміщенням золотників гідророзподільників. Інформація про фактичне положення сфери подається на вхід блока у вигляді трьох просторових координат сфери відповідних виміряним значенням $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$. Основними вхідними параметрами блока є зовнішні сигнали U, φ, Θ , які задають необхідне просторове положення центра сфери.

На основі проведеного математичного моделювання мехатронної системи керування опорного вузла розроблено раціональний алгоритм динамічного регулювання положення сфери. Алгоритм забезпечує підвищення швидкодії адаптивної системи автоматичного керування опорного вузла та поліпшення характеристик регулювання вузла. Алгоритм побудовано за принципом динамічного (імпульсного) переміщення сфери. Динамічне регулювання опорного вузла здійснюється за рахунок додаткового осциляційного переміщення золотників по гармонічним законам. Цим забезпечується імпульсна зміна тиску та витрат в каналах підводу робочого середовища до окремих гідростатичних підп'ятни

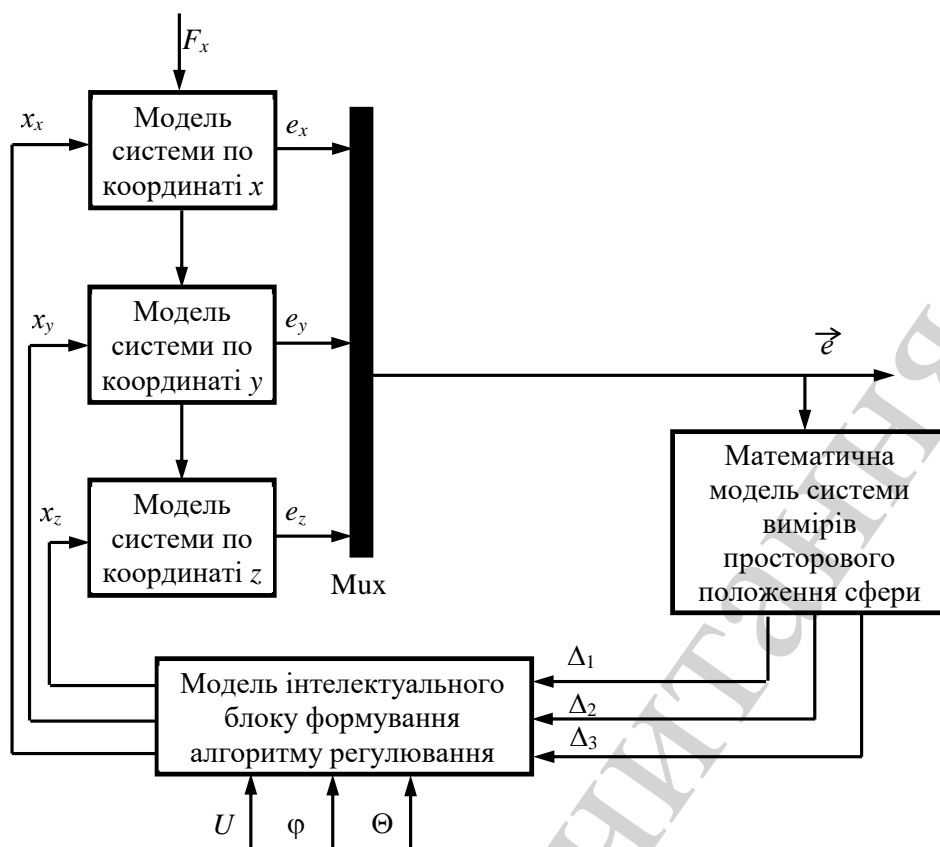


Рис. 17. Блок-схема загальної математичної моделі системи керування опорного вузла

ків, що дозволяє реалізувати полігармонічні закони зміни положення сфери.

Згідно розробленого алгоритму переміщення сфери в напрямку ξ відповідає полі гармонічному закону:

$$\begin{aligned} \xi = & \alpha_1 \cdot a_x \sin(\omega_x t + \psi_x) + \alpha_2 \cdot a_y \sin(\omega_y t + \psi_y) + \\ & + \alpha_3 \cdot a_z \sin(\omega_z t + \psi_z), \end{aligned} \quad (4)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – напрямні косинуси, що задають напрямок ξ переміщення сфери; a_x, a_y, a_z – амплітуди переміщень сфери в напрямках x, y, z ; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – частоти синусоїдальних переміщень сфери; ψ_x, ψ_y, ψ_z – початкові фази синусоїдальних переміщень сфери.

Напрямні косинуси, які входять в залежність (4), визначаються вхідними параметрами ϕ, Θ опорного вузла та заданим напрямком переміщення сфери ξ . Частоти синусоїдальних переміщень сфери при усталеному осциляційному русі відповідають частотам синусоїдальних переміщень золотників гідророзподільників. Амплітуди і початкові фази полігармонічного закону переміщення сфери визначаються частотними характеристиками опорного вузла та системи автоматичного керування.

Полігармонічний закон переміщення сфери в довільному напрямку визначений залежністю (4) відповідає динамічному переміщенню центра сфери по типу просторових фігур Ліссажу.

Просторові фігури Ліссажу охоплюють деякий об'єм – геометричне місце положення центра сфери в просторі. В межах даного об'єму знаходяться траєкторії динамічних переміщень сфери. В залежності від співвідношення частот складових коливань, що входять в (4) змінюється форма траєкторій центра сфери та геометричне місце точок розташування центра сфери в просторі.

Згідно запропонованого раціонального алгоритму, інтелектуальний блок адаптивної системи керування задає необхідне співвідношення частот проєкцій гармонічних переміщень сфери, змінюючи при цьому конфігурацію об'єму, де розташовано центр сфери із еліпсоїдального до дископодібного. При цьому переміщення сфери у напрямку перпендикулярному площині диска зводяться до нуля.

Таким чином, має місце ціле направлена зміна положення сфери в певному напрямку, а відповідно і регулювання положення сфери як основного елемента шарнірного механізму маніпулятора.

9. Обговорення результатів досліджень функціонально-орієнтованої елементної бази маніпуляторів мобільних роботів

По результатам досліджень встановлено, що наземні роботизовані комплекси, оснащені маніпуляторами з паралельними кінематичними зв'язками, мають значно кращі масові та габаритні характеристики.

Перспективна елементна база шарнірних механізмів із приводами зміни розмірів окремих ланок потребує використання шарнірів та агрегатованих з ними приводів.

Розроблений сферичний гідростатичний шарнір (рис. 4) є типовим представником функціонально-орієнтованої елементної бази, оскільки забезпечує високу точність. Похибки, обумовлені змінами довжини штанг, можуть бути компенсовані за допомогою цього ж шарніра. Розроблений опорний вузол (рис. 8) може сприймати значні навантаження, які діють на сферу, іншою його функцією є забезпечення вимірів та точне регулювання положення сфери в просторі.

Регулювання опорного вузла здійснюється за допомогою гідро схеми (рис. 10), а система автоматичного керування забезпечує формування необхідних законів переміщення золотників гідророзподільників. Перевагою такого підходу є те, що похибки маніпулятора компенсуються безпосереднім регулюванням відповідних опорних вузлів.

Шляхом дослідної апробації була розроблена технологія виготовлення деталей опорного вузла. Основною технологічною проблемою, що була вирішена, є забезпечення параметрів якості та точності деталей із точними сферичними поверхнями. В процесі експериментальних досліджень встановлено, що регульована геометрія деталей дозволяє компенсувати відхилення реальної сферичної поверхні від номінальної.

Реальна геометрія сферичних поверхонь визначена за допомогою вимірювальної машини (рис. 12). Представлені математичні моделі не враховують у повній мірі відхилення реальної сферичної поверхні від номінальної. Тому напрямком

подальших досліджень є врахування реальної геометрії сферичних поверхонь при дослідженні робочих процесів у гідростатичних опорних елементах.

Підвищення точності шарніра здійснено шляхом математичного моделювання динамічних процесів опорного вузла. Динамічні характеристики сферичного опорного вузла визначено у вигляді системи передавальних функцій, які описують динаміку кожного гідростатичного підп'ятника згідно залежності (1), а також переміщення сфери. Розроблена математична модель, що враховує робочі процеси дросельного гідророзподільника відповідно до залежності (2).

Саме об'єднання блочних моделей гідророзподільника (рис. 15) силової характеристики опорного вузла (рис. 14) та динамічних переміщень сфери (рис. 13) дозволило одержати загальну структурно-блочну модель системи керування опорного вузла (рис. 16). Система керування, розроблена на основі представленої моделі, дозволить забезпечити високу точність та можливість регулювання опорного вузла.

Оптимальний алгоритм керування положенням сфери вимагає динамічного регулювання, що використовує полігармонічний закон переміщення сфери та відповідає динамічному переміщенню центра сфери по типу просторових фігур Ліссажу. Згідно запропонованого алгоритму, задається необхідне співвідношення частот проекцій гармонічних переміщень сфери, змінюючи при цьому конфігурацію об'єму, де розташовано центр сфери із еліпсоїдального до дископодібного. При цьому переміщення сфери у напрямку перпендикулярному площині диска зводяться до нуля.

9. Висновки

1. В результаті досліджень встановлено, що перспективним видом маніпуляторів мобільних роботів є системи на основі просторових шарнірних механізмів із приводами зміни розмірів окремих ланок механізмів. Для реалізації запропонованих схемних рішень необхідна елементна база у вигляді шарнірів із різним числом ступенів вільності, що забезпечують виску несучу здатність, точність та можливість регулювання.

2. Розроблений регульований гідростатичний опорний вузол забезпечує сприйняття динамічного навантаження до 5 кН і діапазон регулювання положення сфери $-25...+25$ мкм у довільному напрямку. Регулювання здійснюється за допомогою розробленої системи автоматичного керування, що дозволяє змінювати опорні реакції гідростатичних опорних елементів за умови використання датчиків зворотнього зв'язку, що визначають положення сфери у просторі.

3. Структурна математична модель, побудована по блочному принципу та включає блоки, що описують гідродинамічні процеси, що протікають у опорних елементах, що дозволяє отримати силову характеристику опорного вузла, а також блоки, що описують гідродинамічні процеси у розподільниках. Структурна математична модель також включає блок, що описує динамічні переміщення сфери та дозволяє здійснити динамічний аналіз швидкодії та здійснити синтез законів керування сферичного опорного вузла.

4. Для поліпшення динамічних характеристик адаптивної системи регулювання доцільно реалізувати спеціальний алгоритм, що забезпечує полігармоні-

чний закон переміщення сфери в просторі у вигляді просторових фігур Ліссажу. При цьому здійснюється ефективне регулювання положення сфери в заданому напрямку.

Література

1. Korayem, M. H., Dehkordi, S. F. (2018). Derivation of motion equation for mobile manipulator with viscoelastic links and revolute–prismatic flexible joints via recursive Gibbs–Appell formulations. *Robotics and Autonomous Systems*, 103, 175–198. doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.02.013>
2. Rybak, L., Gaponenko, E., Chichvarin, A., Strutinsky, V., Sidorenko, R. (2013). Computer-Aided Modeling of Dynamics of Manipulator-Tripod with Six Degree of Freedom. *World Applied Sciences Journal*, 25 (2), 341–346.
3. Marlow, K., Isaksson, M., Dai, J. S., Nahavandi, S. (2016). Motion/Force Transmission Analysis of Parallel Mechanisms With Planar Closed-Loop Subchains. *Journal of Mechanical Design*, 138 (6), 062302. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4033338>
4. Jiang, X., Cripps, R. J. (2015). A method of testing position independent geometric errors in rotary axes of a five-axis machine tool using a double ball bar. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89, 151–158. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.10.010>
5. Strutynskyi, S. V., Hurzhii, A. A. (2017). Definition of vibro displacements of drive systems with laser triangulation meters and setting their integral characteristics via hyper-spectral analysis methods. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, 1, 75–81.
6. Strutynskyi, S., Kravchu, V., Semenchuk, R. (2018). Mathematical Modelling of a Specialized Vehicle Caterpillar Mover Dynamic Processes Under Condition of the Distributing the Parameters of the Caterpillar. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.3), 40–46. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19549>
7. Li, B., Fang, Y., Hu, G., Zhang, X. (2016). Model-Free Unified Tracking and Regulation Visual Servoing of Wheeled Mobile Robots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24 (4), 1328–1339. doi: <https://doi.org/10.1109/tcst.2015.2495234>
8. Liang, T., Lu, D., Yang, X., Zhang, J., Ma, X., Zhao, W. (2016). Feed fluctuation of ball screw feed systems and its effects on part surface quality. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 101, 1–9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.11.002>
9. Strutynsky, V. B., Hurzhi, A. A., Kolot, O. V., Polunichev, V. E. (2016). Determination of development grounds and characteristics of mobile multi-coordinate robotic machines for materials machining in field conditions. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, 5, 43–51.
10. Joe, H.-M., Oh, J.-H. (2018). Balance recovery through model predictive control based on capture point dynamics for biped walking robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 105, 1–10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.03.004>